

Журнал агробіології та екології. – 2005. – № 1–2. – С. 173–176. 6. Yabolnyk S.H., Kotchubey V.V., Hanyk Ya.M., Trotsky V.I. Derivatographic study of complexly activated samples of clinoptilolite. // Proceeding of X Ukrainian – Polish Symposium on theoretical and experimental studies of interfacial phenomena and their technological applications, part 2. – P. 226–229. 7. Василечко В.О., Грищук Г.В., Кузьма Ю.Б., Загородонський В.О., Василечко Л.О., Лебединець Л.О. Адсорбційні особливості кислотного модифікованого закарпатського клиноптилоліту // Збірник праць 3-го Західноукраїнського симпозиуму з адсорбції та хроматографії. – Львів: СПОЛОМ, 2003. – С. 62–67. 8. Спринський М.І. Мінеральні ресурси цеолітів України// Праці 2-го Західноукраїнського симпозиуму з адсорбції та хроматографії. – Львів, 2000. – С. 221–224. 9. Аксельруд Г.А. Массообмен в системе твердое тело – жидкость. – Львов: Издательство университета, 1970. – 187 с.

УДК 532.517.4:532.135:532.55

В. В.Чернюк¹, А.П. Кононенко²

¹Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра гідравліки та сантехніки,

²Донецький національний технічний університет,
кафедра енергомеханічних систем

ВПЛИВ РІЗНИХ ФАКТОРІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ГІДРОДИНАМІЧНО АКТИВНИХ ДОДАТКІВ

© Чернюк В. В., Кононенко А. П., 2012

Розглянуто вплив окремих фізико-хімічних факторів на ефективність гідродинамічно активних додатків при послабленні ними турбулентного тертя.

Ключові слова: ефект Томса, послаблення турбулентного тертя, гідродинамічно активні добавки.

The influence of some physico-chemical factors on the efficiency of hydrodynamically active additives in reducing turbulent friction is considered.

Key words: Toms' effect, turbulent friction reduction, hydrodynamically active additives.

Вступ

Зростання обсягу виробництва і збільшення промислових потужностей призвело до нестачі енергії та спонукало людство до пошуку енергоощадних технологій. Істотним джерелом економії енергії є зменшення гідродинамічного опору [1, 2]. Порівняння ефективності різних методів послаблення турбулентного тертя, таких як ріблети, піддатливі стінки, полімерні покриття, гідрофобні плівки, мікробульбашки, імплантація волокон, розчини поверхнево-активних речовин, добавки полімерів, показало перевагу трьох останніх (тобто гідродинамічно активних додатків), за яких досягається відносно зменшення гідродинамічного опору на 50–80 % [3]. Гідродинамічно активні добавки (ГДАД) застосовують у багатьох галузях [4] і за різних фізико-хімічних умов. Послаблення турбулентного тертя за допомогою ГДАД відоме під назвою ефекту Томса.

Мета роботи – встановити закономірності впливу різних фізико-хімічних факторів на ефективність гідродинамічно активних додатків.

Фізична суть ефекту Томса

Послаблюють турбулентне тертя малі анізотричні частинки. Унаслідок великого градієнта швидкостей у в'язкому підшарі та буферному поясі видовжені частинки орієнтуються більшими

осями вздовж потоку, спричинюючи анізотропію динамічної в'язкості й нерівномірне поглинання турбулентної енергії за різними напрямками. Випрямлені макромолекули полімеру утворюють уздовж стінки у потоці рідини еластичну пелену [1]. Вихори, що зародились на нерівностях стінки, ударяються об пелену, яка перешкоджає їх прониканню в ядро потоку. Макромолекули полімеру пригнічують тільки малі турбулентні вихори, сумірні з ними, демпфіруючи пульсації у в'язкому підшарі та перехідному поясі. З віддаленням від стінки масштаб дисипативних вихорів у потоці зростає, а взаємодія макромолекул з вихорами послаблюється і припиняється. Ламінарні потоки є безвихровими, тому в них ефект Томса не проявляється.

Вплив окремих факторів на ефект Томса. Форма частинок

Чим вища молекулярна маса полімерів, тим краще вони послаблюють турбулентне тертя [5]. Однак наявність бокових відгалужень послаблює їхню дію, яка визначається насамперед подовженістю частинок, а не розмірами [5]. Найефективнішими з ГДАД є високомолекулярні сполуки з ланцюжковою будовою молекул, такі як поліоксидетилен (ПОЕ) і поліакриламід (ПАА), а також і міцелотворні поверхнево-активні речовини (МПАР), наприклад, метаупон і диталан.

У нерухомій рідині макромолекула полімеру згорнута в еліпсоїдний клубок. У зсувному полі потоку вона розгортається, орієнтуючись вздовж ліній течії, спричинюючи цим анізотропію в'язкості. Мірою гнучкості чи жорсткості полімерного ланцюжка є довжина його сегмента, який, своєю чергою, складається з ланок (рис. 1). Кількість останніх – 5–10 у гнучколанцюжкових полімерів і кілька сотень – у жорстколанцюжкових [6].

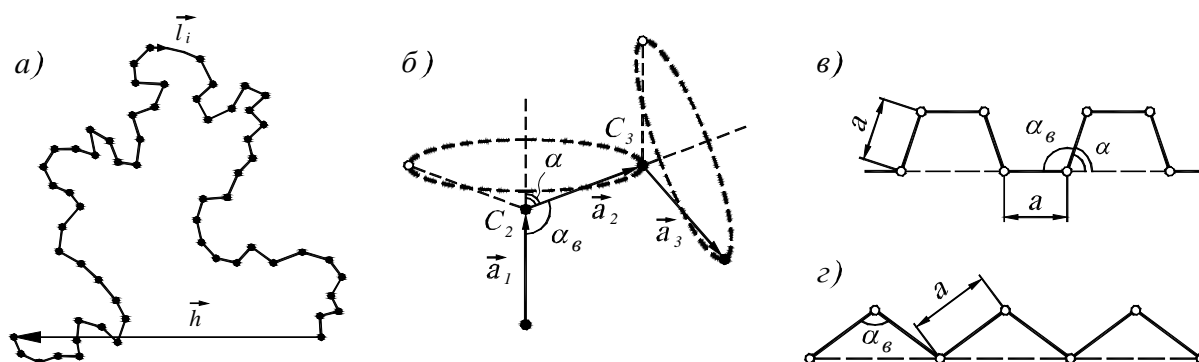


Рис. 1. Елементи полімерних ланцюжків: а – модель із ланцюга вільно сполучених сегментів; б – конуси обертання одиничних зв'язків С-С (вуглецю) у ланцюжку ПОЕ; в, г – можливі конфорації ланцюга поліетилену в гранично випрямленому стані: \vec{h} – відстань між кінцями ланцюга; \vec{l}_i – довжина сегмента молекули, що містить декілька ланок; \vec{a}_i – довжина ланки у сегменті; α_a – валентний кут зв'язку С-С; α – додатковий кут [6, с. 85, 89]

Гідродинамічна ефективність полімерів посилюється зі зростанням середньоквадратичного радіуса інерції макромолекули [7]:

$$\left(\overline{S^2}\right)^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{z a^2 l^2}{6}}, \quad (1)$$

де z – кількість сегментів; a – коефіцієнт набухання; l – довжина сегмента макромолекули (рис. 1). Більшому радіусові $(\overline{S^2})^{1/2}$ відповідає довша макромолекула.

Форму полімерного ланцюжка характеризує вектор \vec{h} , який з'єднує кінці молекули (рис. 1, а). Довжина макромолекули ПОЕ, що в нерухомому істинному розчині згорнута, приблизно в 100 разів перевищує значення довжини середньоквадратичного розміру $(\overline{h^2})^{1/2}$, яка за цих умов дорівнює 0,2...0,5 мкм [5]. Чим більшою є відстань \vec{h} , тим скоріше розгортається молекула в потоці.

Очевидно, що за повного випрямлення (рис. 1, в, з) досягається максимальне послаблення турбулентного тертя.

Концентрація ГДАД у потоці

Істотно зменшити гідравлічний опір трубопроводів малих діаметрів можна при течії виключно розведених розчинів полімерів, з концентрацією $C < 1ppm$, де $1ppm = 10^{-6} \text{ кг/кг}$. При течії в трубі $d = 6 \text{ мм}$ водних розчинів поліакриламід Е10 із концентрацією $C = 2 \cdot 10^{-8} \text{ кг/кг}$ Д. Р. Олівер і С. І. Бахтіяров [8] спостерігали зменшення її гідродинамічного опору на 2 %, а коли C збільшили до $C = 4 \cdot 10^{-7} \text{ кг/кг}$, то зменшення опору сягало 35 %. Ефект посилюється зі збільшенням концентрації полімеру до $C = C_{eff}$, коли $I = I_{min}$. З подальшим підвищенням концентрації понад C_{eff} коефіцієнт I починає зростати, тобто при $C > C_{eff}$ ефект зменшення опору додатками вироджується, що показано на рис. 2 у відносних координатах $\Delta I / I = f(C)$, де $\Delta I / I$ – відносна зміна значень коефіцієнта I , викликана наявністю в потоці ГДАД:

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{I_w - I_s}{I_w}, \quad (2)$$

де I_s – гідравлічний коефіцієнт тертя для труби при течії рідини без ГДАД; I_w – те саме, якщо у потоці є ГДАД, за однакових інших умов.

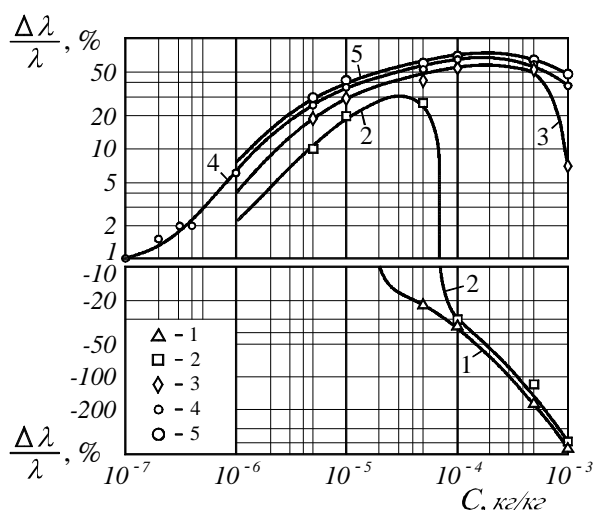


Рис. 2. Відносна зміна гідравлічного коефіцієнта тертя I залежно від концентрації C водних розчинів ПАА при їх течії у трубі $d = 5,81 \text{ мм}$ для різних значень критерію Рейнольдса:

$(1 \dots 4) \cdot 10^3$ – (1); $5 \cdot 10^3$ – (2); 10^4 – (3); $2 \cdot 10^4$ – (4); $3 \cdot 10^4$ – (5) [9, с. 211]

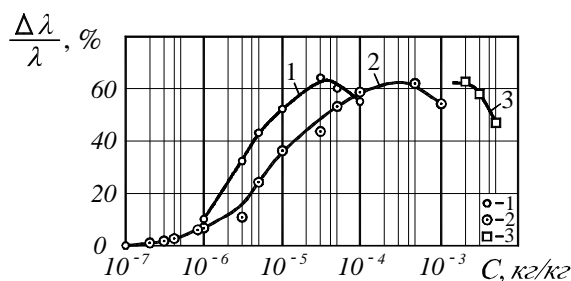


Рис. 3. Відносна зміна гідравлічного коефіцієнта тертя I залежно від концентрації C різних ГДАД: ПОЕ – (1); ПАА – (2); метанулон за наявності в розчині 7% NaCl – (3), при їх течії у трубі $d=5,81 \text{ мм}$ для $Re = 2 \cdot 10^4$ [9, с. 213]

На практиці для зменшення гідродинамічного опору використовують розчини дещо менших концентрацій: $C_{opt} < C_{eff}$. Значення C_{opt} встановлюють техніко-економічними розрахунками. Екстремальний характер залежності $I = f(C)$ справедливий для всіх типів ГДАД (рис. 3).

Час релаксації

Швидкість переходу макромолекул із нерівноважного в рівноважний стан істотно впливає на їхню гідродинамічну ефективність. Рівновага полімерів порушується в зсувних потоках. Час, який потрібен для повернення у рівноважний стан, називають часом релаксації. У водному розчині поліметаакрилової кислоти із концентрацією $C = 10^{-3}$ кг/кг і $pH = 5$ тривалість обертальної релаксації J сегмента макромолекули дорівнює $2 \cdot 10^{-10}$ с [7]. У розведених полімерних розчинах релаксаційні процеси відбуваються швидше.

Водневий показник pH середовища

Збільшення значення водневого показника спричиняє зростання радіуса інерції молекули полімеру. Для розчину поліметаакрилової кислоти при $pH = 2$ величина $(\bar{S}^2)^{1/2} = 2,2 \cdot 10^{-8}$ м, а при $pH = 9$ маємо $(\bar{S}^2)^{1/2} = 3,8 \cdot 10^{-8}$ м [7].

Зі зростанням $(\bar{S}^2)^{1/2}$ збільшується в'язкість розчину. Найвища вона при $pH \approx 7$, коли вплив іонізованих груп CO^{0-} призводить до розгортання молекулярного ланцюга макромолекули, який набуває високої жорсткості. За високих значень pH надлишок електроліту спричинює екранізацію карбоксильних груп і, як наслідок, викликає згортання макромолекул полімеру, які набувають високої гнучкості й легко деформуються в потоці [10].

ПАА, поліакрилова кислота, карбометилцелюлоза послаблюють турбулентне тертя за значень pH від 2,1 до 12 (рис. 4). У слабких розчинах ПАА максимум зменшення опору досягається в нейтральному середовищі, а за вищих концентрацій – в кислому та лужному. Останній результат, ймовірно, пояснюється ефектом молекулярних зачеплень і сильною гідродинамічною взаємодією між окремими макромолекулами в концентрованому розчині ПАА [10].

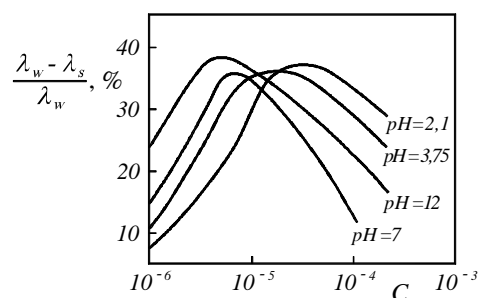


Рис. 4. Послаблення турбулентного тертя в розчинах ПАА при різних значеннях pH (I_s та I_w – гідравлічний коефіцієнти тертя при течіях розчину та розчинника відповідно) [10, с. 185]

Температура розчину ГДАД

Підвищення температури послаблює гідродинамічну ефективність розчинів полімерів і МПАР і спричинює збільшення розмірів макромолекул $(\langle h^2 \rangle)^{1/2}$ у розчині та істотне зменшення часу релаксації J . З рис. 5 видно, що з підвищенням температури зростає значення $Re^o = Re_{nop}$ [10].

Під час роботи в тепломережах із температурою води до 130 °С ПАА виявився стійкішим, порівняно з ПОЕ [11]. Створено полімери для застосування у системах гарячого теплопостачання з температурою води до 180 °С [12] і в холодильних контурах [13].

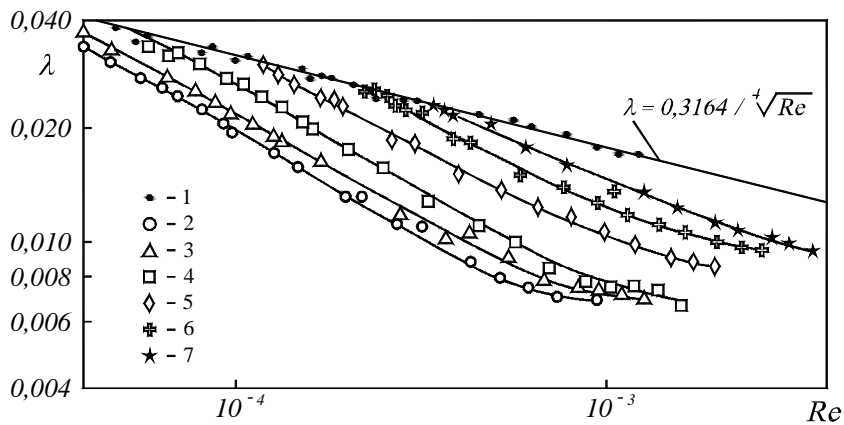


Рис. 5. Значення коефіцієнта λ для труби $d = 9$ мм при течії води – (1) і водних розчинів ПОЕ ($C = 10^{-5}$ кг/кг, $M = 3 \cdot 10^6$) при різних значеннях температури розчину, $^{\circ}\text{C}$: 2° – (2); 10° – (3); 20° – (4); 30° – (5); 50° – (6); 70° – (7); (Re обчислено за в'язкістю розчину) [10, с. 182]

Режим течії

Вплив ГДАД істотний у перехідному та турбулентному режимах течії рідини й починається при $Re \geq Re_{кр}$. Але після досягнення $Re_{кр}$ є ще деяка ділянка чисел Re , в якій відсутня помітна відмінність між потоками розчину та розчинника. Тому критерій Рейнольдса, починаючи з якого проявляється вплив додатків, називають пороговим $Re_{пор}$. Збільшення Re супроводжується посиленням ефекту Томса, але знову ж таки до певних значень критерію Re , за яких розвиваються великі зсувні напруження, що спричинюють деструкцію полімеру. Це видно з рис. 6 для труб найменших діаметрів – 2 і 5 мм.

Діаметр труби

Зі збільшенням діаметра труби ефект послаблення турбулентного тертя слабшає [14] (рис. 6) [4] та (рис. 7) [9, с. 212]. За різних діаметрів труб отримують однакові результати для вузького діапазону фракцій ПОЕ лише за найменших значень $C[m]_0$, де $[m]_0$ – характеристична в'язкість розчинника, $\text{м}^3/\text{кг}$. Максимально досягне зменшення опору для труб більших діаметрів є меншим. Причини цього можуть бути такі: зростання загального масштабу потоку у трубах більших діаметрів; вплив розміру турбулентних структур у буферному поясі; необхідність у потоці певної кількості гідродинамічно активного полімеру.

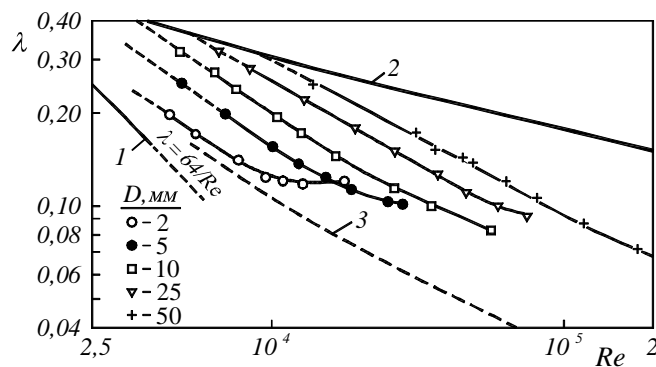


Рис. 6. Вплив діаметра труби на зменшення гідравлічного опору при течії водного розчину ПАА з концентрацією 10 ррт: 1 – крива Пуазейля (ламінарна течія); 2 – крива Прандтля-Кармана (турбулентна течія); 3 – асимптота Вірка [4]

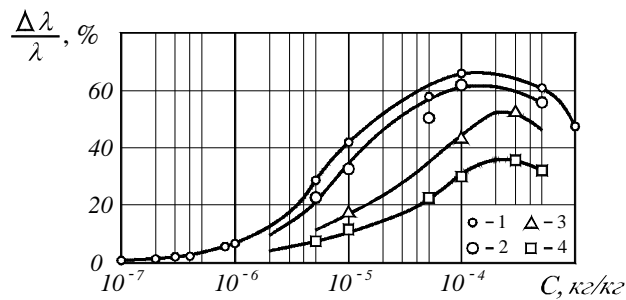


Рис. 7. Відносна зміна гідравлічного коефіцієнта тертя I залежно від концентрації C водних розчинів ПАА при їх течії у трубах різних діаметрів d , мм: 5,81 – (1); 8,70 – (2); 15,64 – (3); 20,95 – (4); ($Re = 3 \cdot 10^4$) [9, с. 212]

Шорсткість стінок труб

За деяких значень критерію Рейнольдса в шорстких трубах спостерігається вагомніше відносне послаблення турбулентного тертя, ніж у гладких, а при течіях розчинів МПАР воно значно вище, ніж максимальна асимптота послаблення опору [15]. Наявність у потоці ГДАД спричинює “затягування” ламінарно-турбулентного переходу до більших значень Re [4] та вихід у режим повного вияву шорсткості, де дія додатків на турбулентність відсутня.

Гідродинамічний ефект водних розчинів ПАА з концентраціями $C \leq C_{eff} = 2 \cdot 10^{-4}$ кг/кг був однаковим для гладкостінної труби з внутрішнім діаметром $D = 20,95$ мм та для ребристої труби Aquadrop $D = 20,45$ мм (рис. 8) зі спіральними різьбopodobними виступами висотою 1 мм. З подальшим підвищенням концентрації спостерігалось послаблення ефекту Томса для гладкої труби та його посилення для ребристої. Якщо при критерії Рейнольдса $Re = 25000$ для гладкої труби отримано максимальне зменшення коефіцієнта I на 30,7 % при $C = 3 \cdot 10^{-4}$ кг/кг (рис. 8, крива 2), то для ребристої труби за тієї самої концентрації ефект становив близько 42 % (крива 3), а при $C = 10^{-3}$ кг/кг – 56,9 %. Тобто максимальне зменшення гідравлічного коефіцієнта тертя, отримане для ребристої труби, у 1,85 раза перевищує відповідне значення для гладкої труби такого самого діаметра. Отож, додатки ПАА ефективніші, коли послаблюється турбулентне тертя у ребристих трубах, але оптимальна концентрація їх при цьому втричі вища.

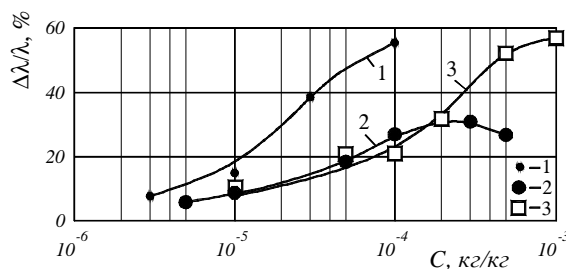


Рис. 8. Залежність $\Delta I / I = f(Re; C)$ для водних розчинів: ПОЕ – (1) та ПАА – (2), (3) при їх течії в гладкостінній трубі $D = 20,95$ мм – (1) і (2) та в ребристій трубі $D = 20,45$ мм – (3) при $Re = 25000$ [9, с. 221]

Дія додатків ПАА на опір ребристої труби така сама за кількісною оцінкою, як вплив ПОЕ на опір гладкої труби за однакових чисел Рейнольдса (рис. 8). Однак концентрація ПАА при цьому повинна бути майже на порядок більшою, оскільки гідродинамічна ефективність ПАА нижча порівняно з ПОЕ.

Трансформація ефекту Томса в місцевих гідравлічних опорах

Наявність місцевих гідравлічних опорів у трубопроводі дестабілізує ефект Томса. У трубі перед місцевим опором ГДАД зменшують турбулентне тертя. У місцевому опорі, залежно від

ступеня деформації потоку в ньому, ефект послаблюється або загасає, або місцеві втрати напору зростають. На ділянці труби, установленій після місцевого опору, якщо вона довга, ефект послаблення турбулентного тертя відновлюється (рис. 9), що пов'язано зі стабілізацією потоку та з поновленням орієнтаційного ефекту. Після конфузора зменшений додатками опір для труби діаметром d відновлюється на коротшій відстані, ніж після раптового звуження труби. Це свідчить про те, що в конфузурі потік деформується менше [16].

Розірвані навпіл макромолекули полімеру не відновлюються. Зруйновані макромолекули МПАР, завдяки дії сил електричного притягання між окремими молекулами, відновлюються, пройшовши місцеві гідравлічні опори, що спричиняють деструкцію.

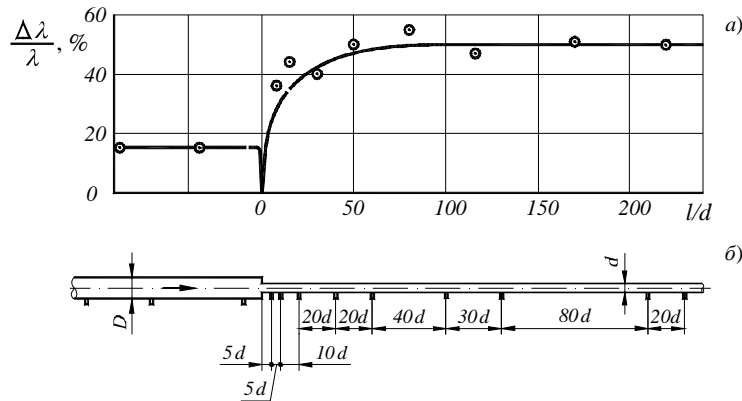


Рис. 9. Динаміка ефекту Томса при течії розчину ПАА з $5 \cdot 10^{-5}$ кг/кг крізь раптове звуження труби: а – залежність $\Delta\lambda/\lambda = f(l/d)$; б – схема експериментального трубопроводу ($D = 20,95$ мм; $d = 5,81$ мм; $Re = 1,8 \cdot 10^4$; вік розчину 15 діб) [16]

Якщо відстані між місцевими опорами менші, ніж $10d$ для звуження (рис. 9, рис. 10) або $10D$ для розширення труби, їх розглядають як комплексний місцевий опір [17, с. 150]. У разі коротких відстаней між місцевими опорами орієнтаційний ефект ГДАД не відновлюється, ефект послаблення турбулентного тертя не проявляється. Спостерігається збільшення гідравлічного опору.

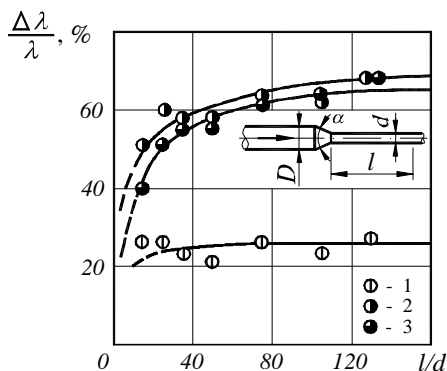


Рис. 10. Відновлення ефекту Томса на ділянці труби після конфузора з кутом конусності $\alpha = 40^\circ$ при течії розчинів ПАА різних концентрацій C в кг/кг: $5 \cdot 10^{-6}$ (1); 10^{-4} (2); $5 \cdot 10^{-4}$ (3); ($D = 20,95$ мм; $d = 5,81$ мм; $Re = 2 \cdot 10^4$) [16]

Інші фактори

Низка інших чинників впливає на гідродинамічну ефективність додатків, серед яких: тип ГДАД; їхня стійкість до деструкції та деградації; швидкість деформації зсуву; спосіб введення у потік; комплексне використання різних ГДАД; застосування ГДАД з іншими методами послаблення турбулентного тертя.

Висновки

З підвищенням концентрації розчину полімерів до C_{eff} ефект Томса посилюється. Подальше збільшення концентрації понад C_{eff} супроводжується виродженням ефекту послаблення турбу-

лентного тертя додатками. Підвищення температури розчину полімеру, так само, як і збільшення діаметра труби, послаблює ефект. Наявність місцевих гідравлічних опорів у трубопроводі дестабілізує ефект Томса, що спричинено порушенням орієнтації макромолекул полімеру уздовж стінок труби та механічною деструкцією окремих макромолекул, які розриваються навпіл. На ділянці труби, установленій після місцевого опору, якщо вона довга, ефект послаблення турбулентного тертя додатками відновлюється, що пов'язано зі стабілізацією потоку рідини та з поновленням орієнтаційного ефекту. Полімери ефективні у розімкнених гідравлічних системах, оскільки зазнають необоротної деструкції, МПАР – надійні у циркуляційних трубопроводах, бо їхні макромолекули, що утворюються завдяки силі електричного притягання, відновлюються після проходження потоку крізь місцеві опори. Додатки полімерів ефективніші в разі послаблення турбулентного тертя у ребристих трубах, порівняно з гладкостінними трубами, але оптимальна концентрація їх при цьому втричі вища. Розбавлені розчини полімерів деградують з плином часу. Однак виявлено, що зберігання протягом восьми років гелю поліакриламідру не зменшило його гідродинамічної активності.

1. Повх І. Л. Зменшення турбулентного тертя – основне джерело економії енергії / І. Л. Повх // Вісн. АН УРСР. – 1982. – № 11. – С. 66–74. 2. Корнилов В. И. Проблемы снижения турбулентного трения активными и пассивными методами (обзор) / В. И. Корнилов // Теплофизика и аэромеханика. – 2005. – Т. 12, № 2. – С. 183-208. 3. Usui Hiromoto. Прогресс уменьшения сопротивления в новом веке / Usui Hiromoto, Suzuki Hiroshi // Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. B. – 2001. – V. 67, № 568. – P. 1305-1310. 4. Козлов Л. П. Гідродинамічний ефект Томса і його можливі технічні застосування / Л. П. Козлов // Вісн. АН УРСР. – 1987. – № 1. – С. 23–33. 5. Кобец Г. Ф. О физическом обосновании механизма снижения сопротивления полимерными добавками / Г. Ф. Кобец // Влияние полимерных добавок и упругости поверхности на пристенную турбулентность. – Новосибирск. – 1978. – С. 24–44. 6. Бартнев Г. М. Физика и механика полимеров: учеб. пособие для вузов / Г. М. Бартнев, Ю. В. Зелнев. – М.: Высш. школа, 1983. – 391 с. 7. Тагер А. А. Физико-химия полимеров / А. А. Тагер. – М.: Наука, 1978. – 536 с. 8. Oliver D. R. Drag reduction in exceptionally dilute polymer solutions / D. R. Oliver, S. I. Bakhtiyarov // J. Non-Newton. Fluid Mech. – 1983. – V. 12, № 1. – P. 113-118. 9. Чернюк В. В. Регулювання інтегральних параметрів напірних потоків рідин гідродинамічно активними додатками: дис... докт. техн. наук: спец. 05.23.16 / Чернюк Володимир Васильович. – Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2010. – 323 с. 10. Пилипенко В. Н. Влияние добавок на пристенные турбулентные течения / В. Н. Пилипенко // Итоги науки и техн. ВИНТИ. Мех. жидкости и газа. – 1980. – Т. 15. – С. 156–257. 11. Leca Aurelia. Drag reduction and heat transfer measurements with polyacrylamides on model of a district heating system / Leca Aurelia, Leca Minodora // Drag Reduct. 3rd Int. Conf., Bristol. – 1984. – P. D8/3-D8/6. 12. Заявка 4018303 ФРГ, МКИ F 17D 1/17. Verfahren zur Reibungsminderung in strömenden Medien / Köhls Ingrid, Pollock Norbert, Haenschke Lothar [und andere] (ФРГ); VEB Wärmeanlagenbau "DSF". – № F 15D/329436; Заявлено 09.06.89; Опубл. 13.12.90. – РЖ Изобретения... Вып. 71. 1991, № 12. – С. 4. 13. Применение гидродинамически активных добавок полимеров и поверхностно-активных веществ в энергосберегающих технологиях / А. Б. Ступин, П. В. Асланов, А. П. Симоненко и др. // Прикладна гідромеханіка. – 2001. – Т. 3 (75), № 1. – С. 74–81. 14. Иванюта Ю. Ф. Экспериментальное исследование турбулентного течения в трубе слабых растворов полимеров / Ю. Ф. Иванюта, Л. А. Чекалова // Инж.-физ. журн. – 1970. – Т. 18, № 6. – С. 1085–1093. 15. Bewersdorff Hans-Werner. Turbulence structure of dilute polymer and surfactant solutions in artificially roughened pipes / Bewersdorff Hans-Werner, Thiel Horst // Appl. Sci. Res. – 1993. – V. 50, № 3–4. – P. 347–368. 16. Чернюк В. В. Восстановление эффекта Томса на участке трубы после сужения / В. В. Чернюк, А. С. Пасичнюк, Р. М. Гнатив // Гидравлика и гидротехника. – Киев: Техника, 1991. – Вып. 52. – С. 77–86. 17. Лабораторный курс гидравлики, насосов и гидротехники: учеб. пособие / [Байбаков О. В., Бутаев Д. А., Калмыкова З. А. и др.] / Под ред. С. С. Руднева и Л. Г. Подвидза. – М.: Машиностроение, 1974. – 416 с.